



7-1

الأهداف

- تقارن بين أنواع الأمواج الزلزالية الثلاثة.

- تصف كيف يعمل مقياس الزلازل (السيزمومتر).

- تفسر كيف استعملت الأمواج الزلزالية في معرفة مكونات باطن الأرض وتركيبها.

مراجعة المفردات

الستار، جزء من باطن الأرض يقع أسفل القشرة الأرضية وفوق اللب.

مفردات جديدة

الأمواج الزلزالية

الأمواج الأولية

الأمواج الثانوية

الأمواج الجسمية

الأمواج السطحية

بؤرة الزلزال

المركز السطحي للزلزال

مقياس الزلزال

محطط الزلزال

الأمواج الزلزالية وبنية الأرض

Seismic Waves and Earth's Interior

الفكرة الرئيسية يتم استعمال الأمواج الزلزالية في تصوّر بنية الأرض الداخلية.

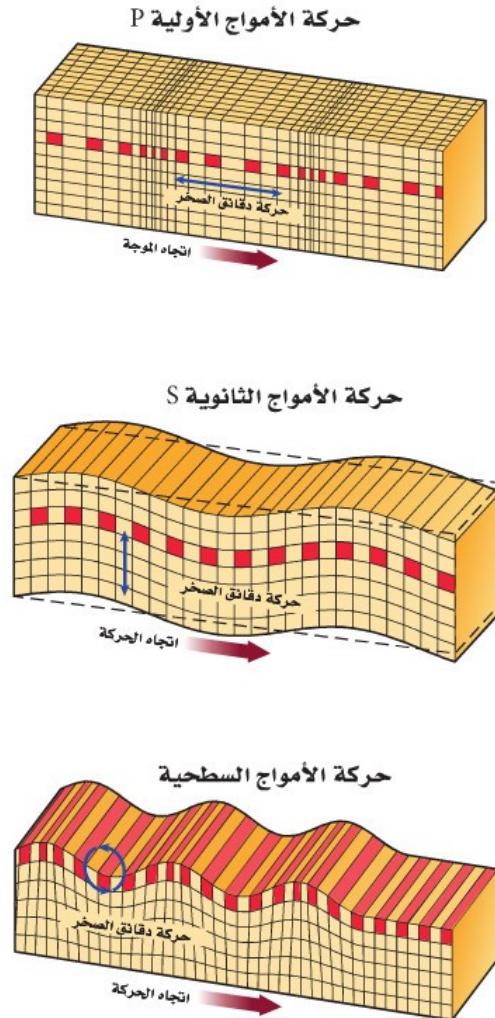
الربط مع الحياة عندما تنظر إلى المرأة فإنك ترى نفسك؛ لأنّ أمواج الضوء تتبعك عن وجهك وتتجه نحو المرأة، ثم ترتد عن سطحها إلى عينيك، فتحدث الرؤية. وبالكيفية نفسها، تنتقل الأمواج الزلزالية في باطن الأرض، وتتعكس عن التراكيب الداخلية معطية بذلك صورة عنها.

الأمواج الزلزالية Earthquake Waves

تنتج معظم الزلزال بفعل الحركة التي تحدث على الصدوع. إن الحركة في الصدوع قد تكون عبر سطوح ملساء نسبياً، أو عبر سطوح خشنة، كما في حركة الكتلتين الخشبيتين المغطتين بورق الصنفرا؛ حيث تعمل السطوح الخشنة على إعاقة الحركة وإيقافها. كذلك مع استمرار حركة الصخور عبر السطوح الخشنة تراكم الجهد فيها، وتعاني الصخور من تشوّهٍ مرن، حيث ترجع الصخور إلى وضعها الأصلي عند إزالة الإجهاد عنها. عندما تتجاوز الجهد المتراكم في الصخور حد المرونة، وهو الحد الذي تفقد فيه الصخور خاصية المرونة، فإنها تلتوي أو تمدد، وتتصبح في مرحلة التشوه اللدن. وعندما تنكسر الصخور أو تنزلق عبر السطوح تتحرر الطاقة المختزنة متجهة للزلازل.

أنواع الأمواج الزلزالية Types of seismic waves تسمى الأمواج التي تتشير في الأرض والناتجة عن الزلزال **الأمواج الزلزالية Seismic waves**. ويتيح عن كل زلزال ثلاثة أنواع من الأمواج الزلزالية هي: الأولية والثانوية والسطحية.

الأمواج الأولية Primary waves يطلق عليها أيضاً أمواج P. تعمل الأمواج **الأولية Primary Waves** على تضاغط الصخور وتخلخلها في نفس اتجاه حركتها، انظر الشكل 1-7. لاحظ من الشكل أن حجم الصخر المشار إليه بالرميّات الحمراء الصغيرة يتغير مع مرور الأمواج الأولية فيه. وتشبه الحركة التضاغطية للأمواج الأولية الحركة التي تحدث على طول نابض رخو؛ إذ تنتقل الحركة الموجية على طوله في اتجاه موازٍ لاتجاه شدّه في البداية.

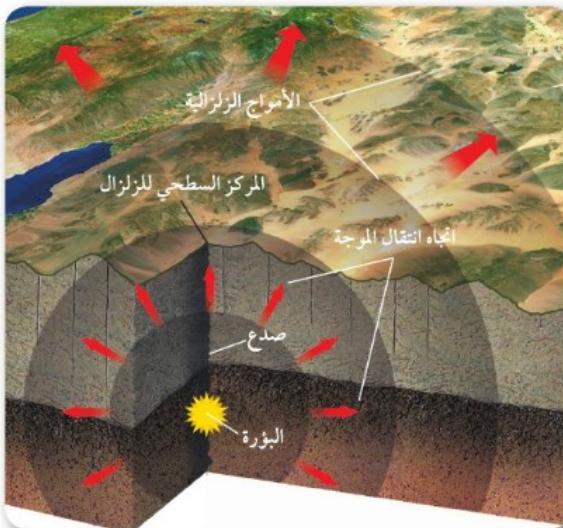


الشكل ١-٧ تمتاز الأمواج الزلزالية بنوع الحركة التي تسببها للصخور التي تمر فيها، حيث تكون حركة جسيمات الصخر إلى الأمام وإلى الخلف وفي نفس اتجاه حركة أمواج - P بينما تكون حركة الأمواج S عمودية على خط انتشار الموجة، وإلى أعلى وإلى أسفل، ومن جانب إلى آخر في الأمواج السطحية.

الأمواج الثانوية Secondary waves يطلق عليها أيضًا أمواج S. وسميت **الأمواج الثانوية Secondary Waves** لأنها أبطأ من الأمواج الأولية، وهي ثانية الأمواج الزلزالية وصولاً إلى محطة الرصد. وسبب الأمواج الثانوية في أثناء حركتها حركة جسيمات الصخر عمودياً على اتجاه حركتها، كما في **الشكل ١-٧**، وتشبه الحركة الموجية في الجبل؛ حيث تنتقل عمودياً إلى أعلى وإلى أسفل من أحد طرفيه إلى الطرف الآخر. وتسمى كل من **الأمواج الأولية والثانوية الأمواج الجسمية Body waves**؛ لأنها تنتقل داخل الأرض.

الأمواج السطحية Surface waves تنتقل **الموجات السطحية Surface waves** على سطح الأرض فقط، وهي أبطأ الأمواج الزلزالية، لذلك فهي ثالث الأمواج وصولاً إلى محطة الرصد وتنسب في حركة جسيمات سطح الأرض حركة جانبية إلى أعلى وإلى أسفل كحركة الأمواج البحريّة، كما في **الشكل ١-٧**. وتعد من أكثر الأمواج الزلزالية تدميرًا؛ لأنها تسبّب معظم أنواع الحركة، كما أنها تستغرق وقتاً أطول لعبور الصخور.

نشأة الأمواج الزلزالية Generations of seismic waves تنشأ أولى الأمواج الزلزالية الجسمية في نقطة الكسر في صخور القشرة الأرضية، وتنتشر منها في جميع الاتجاهات، وتسمى هذه النقطة **بؤرة الزلزال Focus**، وتقع في معظم الأحيان على عمق يبلغ عدة كيلومترات أسفل سطح الأرض. أما النقطة التي تقع على سطح الأرض مباشرة فوق **بؤرة الزلزال** **Epicenter** الشكل 2-7، وتنشأ الأمواج الزلزالية السطحية عن **المركز السطحي للزلزال Epicenter** الشكل 2-7، وتنشأ الأمواج الزلزالية السطحية عن المركز السطحي للزلزال، وتنتشر منها على سطح الأرض.



الشكل 2-7 بؤرة الزلزال هي النقطة التي ابتدأ عندها تشكُّل الكسر في الصدع. وتسمى النقطة التي تقع على سطح الأرض مباشرة فوق البؤرة المركَّز السطحي للزلزال.
استنتاج. حدد النقطة التي يكون عندها الدمار الذي تسبِّبه الأمواج السطحية أكبر ما يمكن.

وتنتقل الطاقة المنبعثة من بؤرة الزلزال في جميع الاتجاهات على هيئة موجات زلزالية. وتبلغ قوَّة الزلزال أكبر ما يمكن في بؤرة الزلزال، وكلما ابتعدنا عن البؤرة قلت قوَّة الموجات الزلزالية وخففت بسبب المقاومة التي تواجهها في أثناء مرورها في صخور القشرة الأرضية. وتصنف الزلزال بحسب عمق البؤرة، كما في الشكل 3-7، إلى ثلاثة أنواع: الزلزال الضحل الذي تنشأ على عمق أقل من 70 km، والزلزال المتوسطة التي تنشأ على عمق 70–300 km، والزلزال العميق الذي تنشأ على عمق 300–700 km.

ويوضح الشكل 3-7 العلاقة بين نطاق الطرح - الناتج عن غطس صفيحة أرضية أسفل صفيحة أخرى - وحدوث الزلزال. ولا تحدث الزلزال العميق إلا في هذا النوع من الحدود. والمسؤول عن حدوث الزلزال في هذا النطاق - وبخاصة العميق منها - هو الصفيحة الغاطسة الصلبة؛ حيث يسبب غطس الصفيحة إلى أسفل تراكم الجهد فيها، مما يؤدي إلى تكسيرها وتحرير طاقة على شكل أمواج زلزالية ذات بؤر مختلفة الأعماق.



الشكل 3-7 تصنف الزلزال بناء على عمق البؤرة إلى زلزال ضحل ومتوسط وعميق. وتعد الزلزال الضحل أكثرها تدميراً.



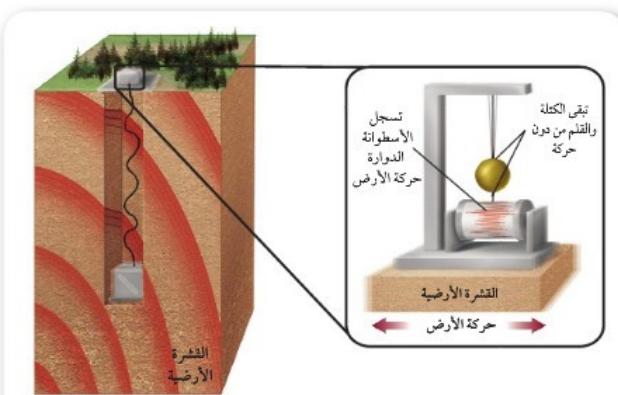
الشكل 4-7 أحد أجهزة مقياس الزلزال (السيزمومتر) الحديثة.

مقياس الزلزال ومحطته Seismometer and Seismogram

لا يمكن الإحساس بالاهتزازات الناجمة عن الأمواج الزلزالية على مسافات بعيدة جدًا عن المركز السطحي، ولكن يمكن اكتشافها عن طريق جهاز حساس يسمى مقياس الزلزال (السيزمومتر) Seismometer، انظر الشكل 4-7.

تتألف بعض أجهزة السيزمومتر من أسطوانة دوارية مغطاة بورقة، وقلم أو أي أداة للتسجيل، وكتلة معلقة كالبندول. تختلف أجهزة السيزمومتر في تصمييمها، ولكنها

جميعاً تتضمن إطاراً مثبتاً في الأرض، وكتلة معلقة على نابض أو سلك، كما في الشكل 5-7.



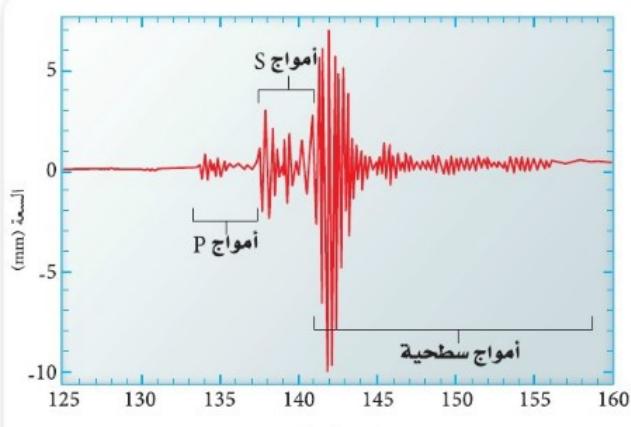
الشكل 5-7 في الإطار جهاز سيزمومتر قديم مثبت في الأرض. عندما يحدث الزلزال يتحرك الإطار بينما تبقى الكتلة المعلقة وملحقاتها دون حركة، فيُسجل الكتلة والقلم الحركة النسبية للإطار. **قارن** ذلك بأجهزة الاستقبال والإرسال الحديثة.

عندما يحدث الزلزال تبقى الكتلة والقلم في أثناء حدوث الاهتزاز من دون حركة بسبب القصور الذاتي، فيتم تسجيل حركة الكتلة بالنسبة إلى الإطار على أداة للتسجيل كالورقة، أو تسجيل مباشرة على أقراص حاسوبية. ويسمى السجل الذي يتم الحصول عليه من السيزمومتر **محطط** **الزلزال (السيزموجرام)** **seismogram**، ويوضح **الشكل 6-7** جزءاً من السيزموجرام.

وستستخدم في الوقت الحاضر أجهزة حديثة لرصد الزلزال وتحليلها؛ حيث تستخدم الأقمار الصناعية في نقل البيانات من محطات الرصد الزلزالي إلى باقي المحطات في العالم. ويتم استخدام برامج حديثة في تحليل البيانات وتحديد موقع الزلزال وقوتها ويستخدم الحاسوب الآلي في تخزينها.

منحنيات المسافة-زمن الوصول للأمواج الزلزالية Travel-time curves تنتقل الأمواج الزلزالية من بؤرة الزلزال، وتسجل بأجهزة السيزمومتر؛ حيث يتم زراعة هذه الأجهزة على مسافات بعيدة. وقد استطاع علماء الزلزال من خلال بيانات أزمنة وصول الأمواج الزلزالية التي جمعوها عبر سنوات عديدة في مناطق متعددة من العالم أن ي Deduce منحنيات معيارية عالمية للعلاقة بين المسافة وزمن الوصول للأمواج الزلزالية P و S، كما في **الشكل 7-7**، وتزودنا هذه المنحنيات بمتوسط أزمنة وصول جميع أمواج P و S من أي مكان على الأرض يحدث فيه الزلزال.

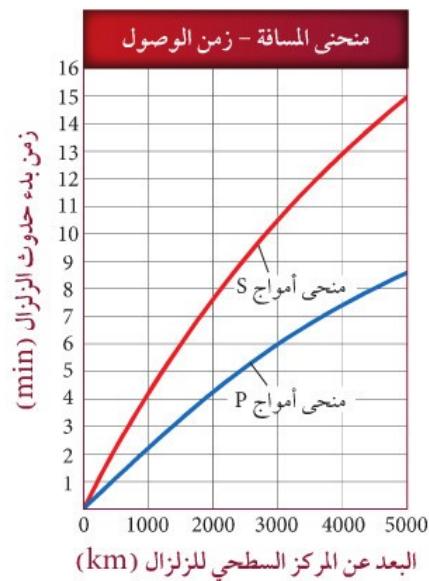
ماذا قرات؟ **لخص** كيف يستعمل السيزموجرام في إعداد منحنيات عالمية لمنحنى المسافة - زمن الوصول؟



الشكل 6-7 يوفر السيزموجرام سجلاً للأمواج الزلزالية التي عبرت نقطة معينة.

الشكل 7-7 تظهر منحنين المسافة – زمن الوصول للأمواج الزلالية أن الفترات الزمنية التي تستغرقها أمواج P و S للوصول إلى محطات رصد الزلزال مختلفة لاختلاف بُعد المحطات عن المركز السطحي للزلزال.

حدد الفترة الزمنية التي تستغرقها أمواج P لزلزال يقع على بُعد 2000 km لتصل محطة الرصد. وما الفترة الزمنية التي تستغرقها أمواج S لقطع المسافة نفسها؟



البعد عن المركز السطحي للزلزال **Distance from the epicenter** لاحظ من الشكلين 6-7 و 7-7 أن أمواج P هي أول الأمواج الزلالية وصولاً إلى محطات الرصد، ويليها الأمواج الثانوية، وأخيراً الأمواج السطحية. يلاحظ أن الفرق الزمني بين منحنين P و S في الشكل 7-7 يزداد كلما زاد البُعد عن المركز السطحي للزلزال، أي أن فرق زمني الوصول بين أمواج P و S في السismoغرام يكون أكبر في المحطات بعيدة عن المركز السطحي للزلزال مقارنة بالمحطات القريبة. ويُستعمل هذا الفرق الزمني في حساب بُعد المركز السطحي للزلزال عن محطة الرصد التي سجلت الزلزال.

أدلة على بنية الأرض الداخلية

Clues to Earth's Interior

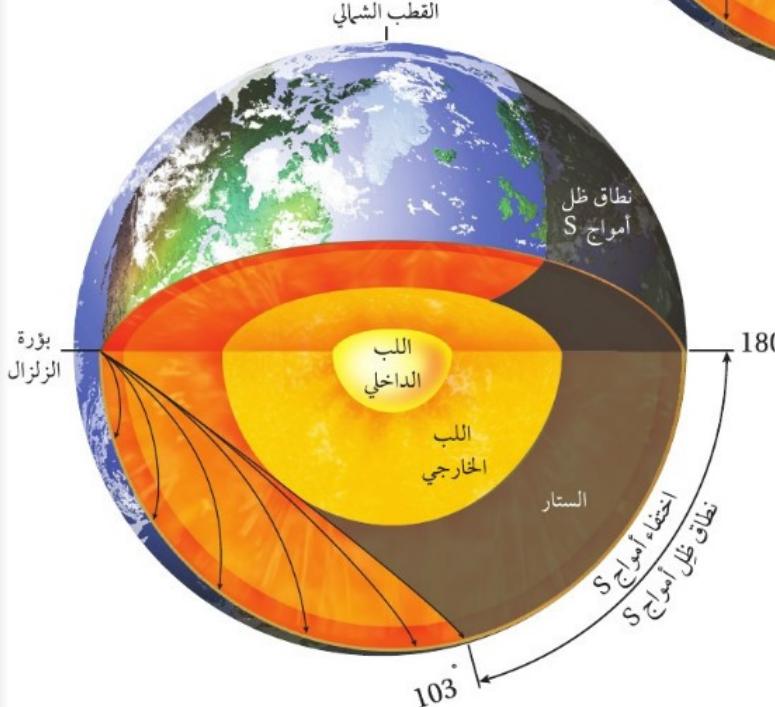
لا تعمل الأمواج الزلالية على اهتزاز سطح الأرض فقط وما تحدثه من دمار، بل تنتقل أيضاً إلى داخلها، لذلك فهي توفر معلومات قيمة للعلماء تمكنهم من بناء نموذج عن بنية الأرض الداخلية.

مكونات الأرض **Earth's composition** يوضح الشكل 8-7 أن الأمواج الزلالية يتغير مسارها وسرعتها عندما تواجه حدوداً فاصلة بين طبقتين مختلفتين في مكوناتها، وبذلك استطاع العلماء أن يحددوا سمك طبقات الأرض ومكوناتها بمقارنة سرعة الأمواج الزلالية مع القياسات التي حصلوا عليها في المختبرات لأنواع مختلفة من الصخور. وتوصلوا نتيجة لذلك إلى أن الستار العلوي يتكون من صخر البيرودوبيت (يتكون معظمها من معدن الأوليفين)، وأن اللب الخارجي يتكون معظمها من مصهور الحديد والنikel، أما اللب الداخلي فهو في حالة صلبة ويتألف معظمها من الحديد والنikel.

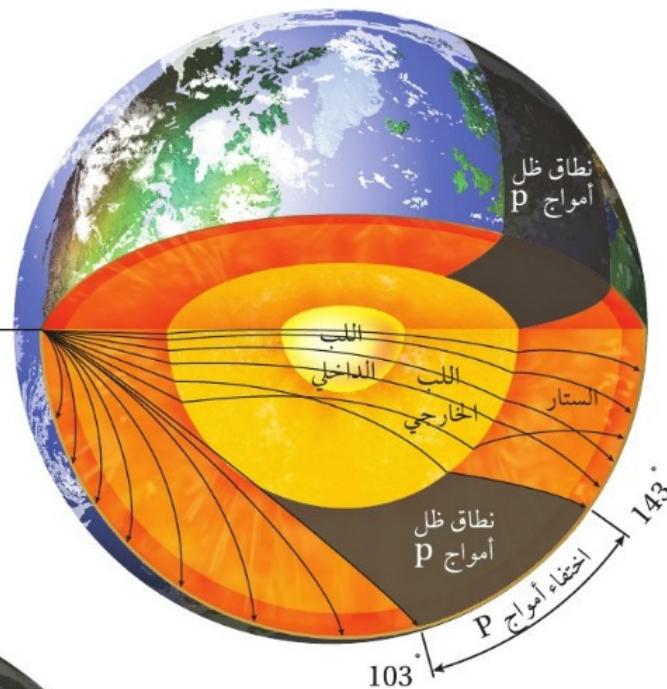
الأمواج الزلزالية Seismic Waves

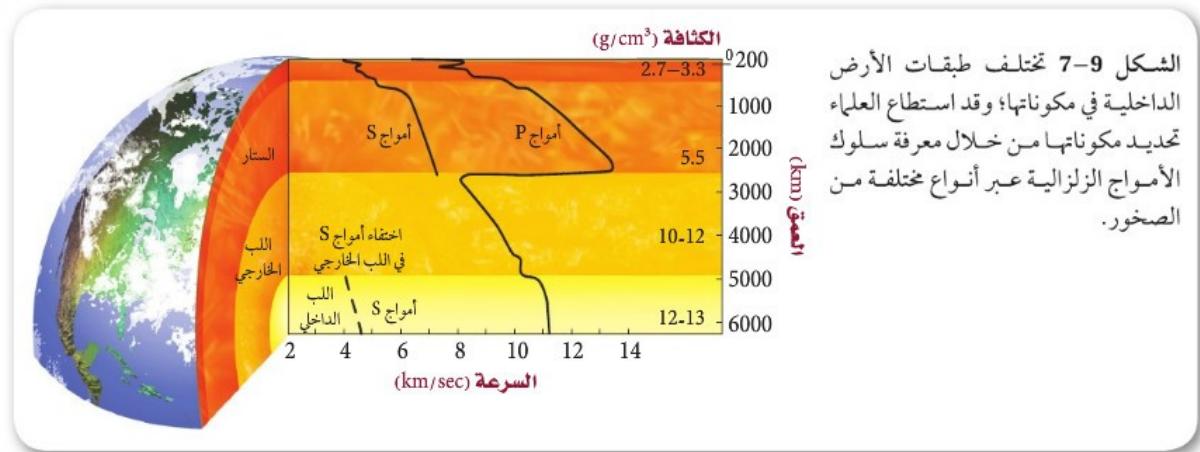
الشكل ٨-٧ يزودنا كل من زمن الوصول وسلوك الموجات الزلزالية بصورة تفصيلية لبنية الأرض الداخلية. كذلك تزودنا هذه الأمواج بأدلة على مكونات أجزاء الأرض المختلفة.

يؤدي انكسار أمواج P عند اللب الخارجي إلى تكوين نطاق ظل على سطح الأرض، بحيث لا تظهر أمواج P على المخطط الزلزالي (السيزمogram) على بعد زاوي يتراوح بين 103° - 143° عن المركز السطحي للزلزال، بينما تظهر أمواج P على أجهزة السيزمومتر في الجانب المقابل للمركز السطحي للزلزال.



لأن أمواج S لا تمر من خلال اللب الخارجي للأرض السائل، لذلك فإنها لا تظهر ضمن نطاق يسمى ظل أمواج S على بعد زاوي يتراوح بين 103° - 180° عن المركز السطحي للزلزال.





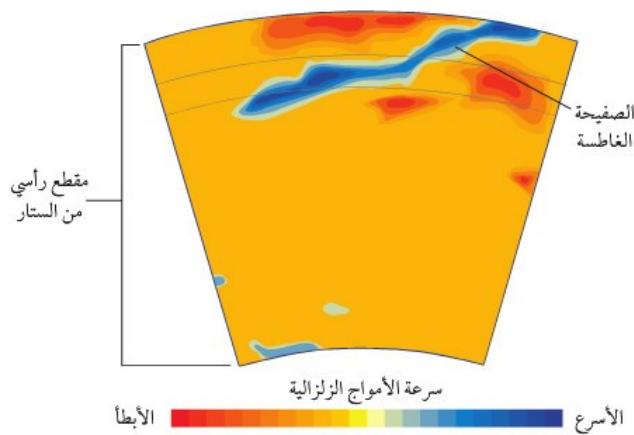
الشكل 9-7 مختلف طبقات الأرض الداخلية في مكوناتها؛ وقد استطاع العلماء تحديد مكوناتها من خلال معرفة سلوك الأمواج الزلزالية عبر أنواع مختلفة من الصخور.

بنية الأرض الداخلية Earth's internal structure تغير سرعة الأمواج الزلزالية واتجاهها عندما تواجه مواد مختلفة في باطن الأرض. لاحظ من الشكل 9-7 كيف تتبع أمواج P و S في البداية مساراتٍ مباشرةً إلى حد ما في أثناء عبورها للستار، ولكنها تعانى من انكسار وانعكاس عندما تعبر الحدود الرئيسية بين طبقات الأرض. لذلك استطاع علماء الزلازل من خلال رصد زمن ومسافة الأمواج الزلزالية ومسار كل موجة وتمثيلها بيانيًا في منحنيات المسافة – زمن الوصول، معرفة أن مكونات الأرض والكتافات تختلف من الداخل.

ماذا يحدث لأمواج S عندما تنشأ بفعل الزلزال؟ للإجابة عن هذا السؤال: أولاً، توصل علماء الزلازل إلى أن أمواج S لا تسير في الأوساط السائلة، ولاحظوا أنها لا تسير في مركز الأرض، مما جعلهم يكتشفون أن جزءاً من باطن الأرض يوجد في الحالة السائلة القليلة اللزوجة. وقد أيدت البيانات التي جُمعت حول مسار الأمواج الزلزالية و الزمن وصوها في باطن الأرض إلى أن لب الأرض الخارجي سائل ولبها الداخلي صلب.

تصور باطن الأرض Imaging Earth's interior تتأثر كل من سرعة الأمواج الزلزالية وكثافة الصخور بعوامل أخرى غير العمق، منها درجة الحرارة. تذكر ما درسته من قبل أن الصفيحة المحيطية الباردة تغوص في الستار في أثناء عملية الطرح، وأن اندفعات الصهارة الساخنة (أعمدة الصهارة) ترتفع إلى أعلى في الستار، وأن سرعة الأمواج الزلزالية تعتمد على درجة الحرارة والمكونات، لذلك فمن الممكن استعمالها في تصوّر تركيب الأرض الداخلية، مثل الصفائح وأعمدة الصهارة الساخنة، وتقل سرعة الأمواج الزلزالية عموماً مع تزايد درجات الحرارة، لذلك تنتقل ببطء في المناطق الساخنة، وبسرعة أكبر في المناطق الباردة. وباستعمال قياسات الأمواج الزلزالية المتقطقة بأجهزة قياس الزلزال (السيزمومترات) في مختلف أنحاء العالم، وسجلات الأمواج الزلزالية لعدة آلاف من الزلزال، يمكن الحصول على صور لبنيّة الأرض الداخلية تتضمن بعض التراكيب، ومنها الصفيحة الغاطسة التي تتضح في الشكل 10-7. ويمكن تشبيه هذه الصور بالصور المتقطقة بالأشعة السينية.

الشكل 10-7 تم التقاط هذه الصورة في اليابان من خلال تتبع مسارات الأمواج الزلزالية في باطن الأرض؛ حيث تشير المناطق الحمراء إلى سرعات الأمواج الزلزالية الأبطأ من القيمة المتوسطة، وتشير المناطق الزرقاء إلى سرعات الأمواج الأسرع من القيمة المتوسطة. كذلك تمثل المنطقة الزرقاء في الصورة الصفيحة الغاطسة.



التقويم 1-7

الخلاصة

- أنواع الأمواج الزلزالية ثلاثة: أولية وثانوية وسطحية.
- مقاييس الزلزال (السيزمومتر) جهاز يستقبل الأمواج الزلزالية، ويسجلها على مخطط الزلزال (السيزمogram).
- استطاع العلماء أن يحددوا المركز السطحي للزلزال من الفرق الزمني بين زمني وصول كل من أمواج P وأمواج S.
- تتغير سرعة واتجاه كل من أمواج P وأمواج S عندما تواجه حدودًا فاصلة بين مواد مختلفة.
- يمكن الحصول على صورة مفصلة عن مكونات الأرض الداخلية من خلال تحليل الأمواج الزلزالية التي تعبّر باطن الأرض.

فهم الأفكار الرئيسية

- الفكرة الرئيسية** وضح كيف تستعمل كل من أمواج P وأمواج S في تحديد خواص لب الأرض؟
- رسم مخططًا سبيرومتر يوضح كيف تُقاس اهتزازات الأرض وتسجل على السيزموجرام.
- صف كيف يستعمل منحنى المسافة-زمن الوصول في دراسة الزلزال؟
- ميز بين سرعة الأمواج الزلزالية في أثناء مرورها في المواد الباردة والمواد الساخنة.

التفكير الناقد

- اربط بين حركة الأمواج الزلزالية مع ملاحظات شخص يراقب كيفية انتقالها على سطح الأرض.
- استنتاج باستعمال الشكل 6-7 الذي يمثل مخططًا زلزاليًا، فسر لماذا تعد الأمواج السطحية أكثر الأمواج الزلزالية تدميرًا، على الرغم من أنها آخر الموجات وصولاً إلى محطات الرصد؟

الكتابية في الجيولوجيا

- اكتب مقالة حول الطرائق التي يعتمدتها العلماء في معرفة مكونات الأرض الداخلية.